

0716633-1

КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Бавилова Евгения Леонидовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ФАЗОВОГО
РАССЛОЕНИЯ В КУПРАТАХ ЛАНТАНА МЕТОДАМИ
ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА И
СКВИД МАГНЕТОМЕТРИИ.**

(01.04.07. – физика твердого тела)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



КАЗАНЬ – 2000

Работа выполнена в лаборатории перспективных материалов
Казанского физико-технического института КНЦ РАН.

Научный руководитель	доктор физико-математических наук, Г.Б.Тейтельбаум
Научный консультант	кандидат физико-математических наук, Н.Н.Гарифьянов
Официальные оппоненты	доктор физико-математических наук, профессор Косов А.А. кандидат физико-математических наук, доцент Дуглав А.В.

Ведущая организация
НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ

Институт Физики Металлов УрО РАН
(г. Екатеринбург)



870055

Защита состоится 25 мая 2000 года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д.053.29.02. при Казанском государственном университете (420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета.

Автореферат разослан «24» апреля 2000г.

Ученый секретарь Диссертационного Совета,
доктор ф.-м. наук, профессор

Еремин М.В.

Общая характеристика работы.

Актуальность темы исследования. Можно считать хорошо установленным, что склонность к фазовому расслоению [1] является общей чертой, характерной для высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП), полученных на основе купратов. Это свойство, несомненно, является очень важным для понимания природы сверхпроводимости в ВТСП. По всей вероятности, фазовое расслоение как явление, присущее многим соединениям с нестехиометрическим составом, может быть существенным и для достижения сверхпроводимости в других металлоксидах, например натрий-вольфрамовых бронзах. Следует иметь в виду существование двух различных типов фазового расслоения — электронного и структурного (примесного). Первый из них соответствует очень малой подвижности примесных атомов, когда можно говорить лишь о термодинамическом равновесии по отношению к носителям заряда [2]. Второй случай соответствует высокоподвижным примесным атомам, которые могут равновесно распределяться по кристаллу [3]. Несмотря на то, что фазовое расслоение в ВТСП изучается уже в течение длительного времени, вопрос о том, как это происходит и в какой связи с явлением высокотемпературной сверхпроводимости находится, до сих пор полностью не разрешен. Вследствие этого, исследование процессов фазового расслоения в купратах является весьма актуальным.

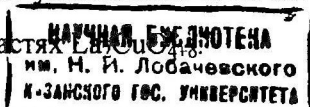
Целью данной диссертационной работы являлось исследование различных типов фазового расслоения в купратах лантана методом ядерного квадрупольного резонанса.

Такой класс высокотемпературных сверхпроводников как купраты лантана представляется особенно интересным для изучения

фазового расслоения, поскольку к нему относятся ВТСП, ярко демонстрирующие оба типа фазового расслоения. Соединение $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ считается характерным примером сверхпроводника, в котором происходит структурное фазовое расслоение, а в купратах лантана, допированных неодимом, впервые наблюдалась картина электронного фазового расслоения. Ядерный квадрупольный резонанс (ЯКР) весьма продуктивен в исследовании этой проблемы, так как он позволяет получить информацию о локальном окружении ядер, и, таким образом, составить картину и определить параметры реализующегося в данном веществе фазового расслоения. ЯКР позволяет проводить исследования на ядрах атомов, содержащихся в изучаемом веществе, не требуя внедрения специального элемента-метки. ЯКР также позволяет с равным успехом исследовать как монокристаллы, так и порошки, что приобретает особое значение при изучении высокотемпературных сверхпроводников, образцы которых часто представляют собой керамику. Применение других методов исследования (измерение магнитной восприимчивости, рентгеноструктурный анализ) дало возможность сопоставить полученные локальные характеристики со структурными, магнитными и сверхпроводящими свойствами вещества, что является важным для выяснения влияния фазового расслоения на сверхпроводимость в ВТСП и других металлоксидах. Проведенные при выполнении данной диссертационной работы исследования включают изучение как макроскопического ($\text{La}_2\text{CuO}_{4-\delta}$), так и электронного (лантан-стронциевые купраты) фазового расслоения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Экспериментально установлено наличие фазового расслоения в сверхпроводящих областях $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$.



2. Исследован характер и последовательность трансформации различных фаз $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ при изменении содержания избыточного кислорода.

3. Получено прямое экспериментальное подтверждение существования в $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ ферромагнитного упорядочения (петля гистерезиса, центрированная в нулевом поле) и исследовано влияние фазового расслоения на ферромагнетизм в этом соединении.

4. Показано, что спектр ЯКР ^{139}La отражает неоднородное распределение электронной плотности. Изучены долгоживущие магнитные флуктуации в $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_x\text{Nd}_y\text{CuO}_4$ и $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_x\text{Eu}_y\text{CuO}_4$. Установлено, что динамика магнитных флуктуаций существенно зависит от магнитных свойств ионов, стабилизирующих низкотемпературную тетрагональную (НТТ) фазу.

5. Исследования методом ЯКР $^{63,65}\text{Cu}$ позволили непосредственно наблюдать картину фазового расслоения зарядов и спинов в $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$. Изучено влияние НТТ фазы на пиннинг страйп-структуры.

Практическая ценность работы:

1. Разработан метод приготовления образцов $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ с различным содержанием избыточного кислорода, позволяющий выделить наиболее стабильные фазы.

2. По результатам ЯКР исследований на ядрах меди и лантана определены параметры градиента электрического поля и величина внутреннего магнитного поля на позициях меди и лантана в лантановых купратах, допированных барием, стронцием и редкими землями, характеризующие электронное фазовое расслоение в этих соединениях.

Автор защищает:

1. Результаты экспериментальных исследований фазового расслоения обогащенных кислородом областей $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ методами ЯКР лантана и СКВИД магнетометрии.

2. Результаты исследований методом СКВИД магнетометрии свойств $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ в нормальном состоянии, непосредственно свидетельствующие о наличии в этом веществе ферромагнитного порядка.

3. Результаты исследований процессов разделения зарядов и спинов в $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_x\text{Nd}_y\text{CuO}_4$, $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_x\text{Eu}_y\text{CuO}_4$ и $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ методом ЯКР лантана и меди; в том числе установленное влияние НТТ фазы на стабилизацию картины электронного фазового расслоения.

4. Интерпретацию этих результатов, обобщенную в разделе “Основные результаты работы” (см. ниже).

Апробация работы:

Основные результаты работы были доложены на XXI Международной конференции по физике низких температур LT21 (Прага, Чехия, 1996), Международной Конференции по Физике и Химии Молекулярных и Оксидных Сверхпроводников (Карлсруэ, Германия, 1996), V Международной конференции “Материалы и Механизмы Сверхпроводимости Высокотемпературных Сверхпроводников” (Пекин, Китай, 1997), Европейской конференции молодых ученых “Physique en Herbe” (Кан, Франция, 1997), Молодежной научной школе “Актуальные проблемы магнитного резонанса и его приложений” (Казань, 1997), XXII Международной конференции по физике низких температур LT22 (Хельсинки, Финляндия, 1999).

Публикации:

Основное содержание работы отражено в 13 публикациях, в том числе 7 статьях в научных журналах.

Структура и объем диссертации:

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа содержит 150 страниц машинописного текста, в том числе 53 рисунка и список цитируемой литературы из 110 наименований.

Основное содержание работы.

Во введении обосновываются актуальность проблемы, выбор методов и объектов исследования, определяются научная новизна и практическая значимость работы, формулируется цель исследований.

Первая глава имеет обзорный характер. В ней описаны структурные, электронные и магнитные свойства матричного соединения La_2CuO_4 , а также особенности его исследования методом ЯКР. Рассмотрена структура соединений на основе La_2CuO_4 , допированных избыточным кислородом, барием, а также стронцием в сочетании с редкими землями, и особенности фазового расслоения в них, известные к началу выполнения исследований, изложенных в диссертационной работе.

Вторая глава содержит описание образцов - объектов исследования, в том числе изложение нового оригинального метода приготовления образцов $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$, заключающегося вкратце в следующем. Порошковый образец La_2CuO_4 электрохимически на-кислораживался до $\delta = 0.1$, затем содержание кислорода уменьшалось термической обработкой с последовательным увеличением температуры отжига. Такой способ изменения уровня допирования позво-

ляет выделить наиболее стабильные фазы. Во второй главе содержится также описание методики экспериментов и используемых приборов и оборудования (импульсного ЯМР-спектрометра с криогенными приставками, СКВИД-магнетометра и др.).

Третья глава посвящена исследованию фазового расслоения в сверхпроводящих областях $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ методами ЯКР ^{139}La и СКВИД-магнетометрии. Известно, что при температурах, близких к комнатным, $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ распадается на две фазы: с матричной структурой и обогащенную кислородом [4]. Было принято считать, что последняя из фаз однородна, и увеличение δ приводит к росту критической температуры (T_c) в ней. Наши измерения температурной зависимости магнитной восприимчивости, проведенные при последовательном изменении уровня допирования с $\delta=0.1$ до $\delta=0$ продемонстрировали наличие четырех сосуществующих и последовательно сменяющих друг друга сверхпроводящих фаз с различными T_c . ЯКР исследования ^{139}La дали информацию о его локальном окружении и искажении градиента электрического поля на позиции лантана в этих фазах. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что трансформация $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ при уменьшении δ сопровождается перераспределением избыточного кислорода. Обнаружены следующие сверхпроводящие фазы:

- I. Фаза с максимальной $T_c=45\text{K}$, характеризующаяся: а) большим количеством избыточного кислорода, который, в дополнение к стабильным позициям в кристаллической ячейке, занимает также и неустойчивые положения; б) делокализованностью носителей заряда.
- II. Фаза с аномально низкой $T_c=14\text{K}$ при большом содержании избыточного кислорода, характеризующаяся наличием значительного

количества локализованных носителей заряда, в которой, возможно, подавление сверхпроводимости вызвано образованием несоразмерных корреляций зарядов и спинов.

III. Устойчивая фаза с $T_c=30\text{K}$, в которой избыточный кислород занимает стабильные позиции в кристаллической решетке, расположенные, по-видимому, скоррелированным образом.

IV. Устойчивая фаза с $T_c=18\text{K}$, характеризующаяся малым содержанием избыточного кислорода, который занимает стабильные позиции, расположенные случайным образом.

В четвертой главе изложены результаты исследований магнитных свойств $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ с различным содержанием избыточного кислорода при низких температурах. Обсуждается взаимосвязь примесного фазового расслоения и наблюдаемого ферромагнитного упорядочения.

После процесса наислораживания появляется петля гистерезиса намагничивания (рис.1), что прямо свидетельствует о наличии ферромагнитного упорядочения в образце. Мы предполагаем, что ферромагнитное поведение могут демонстрировать несверхпроводящие области с умеренным избыточным содержанием кислорода.

В ходе термической обработки образца с высоким уровнем допирования кислород удаляется, в основном, из областей с самым высоким его содержанием, и эти области переходят в фазу с малым содержанием избыточного кислорода.

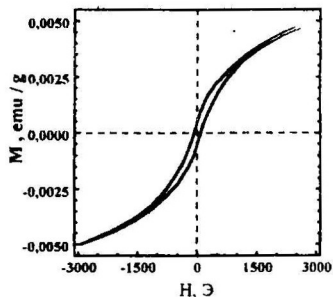


Рис.1. Петля гистерезиса. $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$, $\delta=0.1$, $T=50\text{K}$

Таким образом, когда образец трансформируется из состояния с $\delta=0.1$ к состоянию с $\delta=0.01$, объем ферромагнитных областей увеличивается и, соответственно, растет намагниченность (рис.2). При малом содержании кислорода из-за локализации подвижных носителей заряда, нарушающих магнитный порядок происходит дополнительное увеличение намагниченности. Термическая обработка при высокой температуре ведет к частичному отжигу дефектов, что вызывает уменьшение коэрцитивной силы при малых δ .

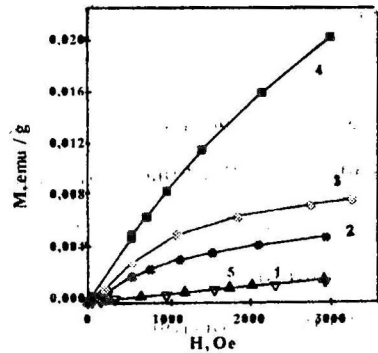


Рис.2. Зависимость намагниченности образца от магнитного поля ($T=50K$). 1 - $\delta=0.1$; 2 - $\delta=0.05$; 3 - $\delta=0.01$; 4 - $\delta=0.005$.

Значительная анизотропия остаточной намагниченности ориентированного образца позволяет заключить, что вектор ферромагнитного упорядочения перпендикулярен к плоскости CuO_2 . Мы можем связать ферромагнитный порядок с переориентацией суммарных магнитных моментов слоев (перпендикулярных к плоскостям CuO_2), возникающих из-за небольшого скоса спинов меди из плоскостей. Такой переориентации могут способствовать антифазные изменения наклона октаэдров CuO_6 , возникающие из-за упорядоченного расположения избыточного кислорода.

Пятая глава посвящена исследованию динамического фазового расслоения зарядов и спинов в La_2CuO_4 , допированном барием, и стронцием в сочетании с редкими землями.

§1. В монокристалле $\text{La}_{1-6x}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ методом нейтронного рассеяния было обнаружено [5] существование скоррелированного пространственного разделения зарядов и спинов - полосовых антиферромагнитных доменов («stripes»), разделенных заряженными доменными стенками. Предполагается, что в купратах лантана устойчивость подобной пространственно-модулированной структуры обусловлена наличием низкотемпературной тетрагональной (НТТ) фазы. Задача настоящей работы состояла в сравнительном ЯКР-анализе (позволяющем изучать как монокристаллы, так и порошковые образцы) особенностей электронного фазового расслоения в лантан-стронциевых соединениях, в которых НТТ фаза стабилизировалась допированием различными редкоземельными ионами: магнитными ионами Nd или немагнитными - Eu.

Наши измерения для La-Nd соединения показали, что при достаточно низких температурах асимметричный сигнал, соответствующий наиболее высокочастотному переходу ($\pm 7/2 - \pm 5/2$)

^{139}La , может быть представлен как суперпозиция двух линий различной ширины, отличающихся частотами ЯКР (Рис.3). Учитывая обнаруженную в этом

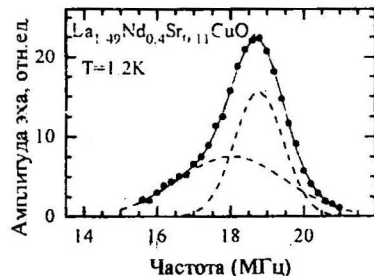


Рис.3. Спектр ЯКР ^{139}La перехода ($\pm 5/2 - \pm 7/2$) при температуре 1.2 K для соединения $\text{La}_{1.49}\text{Nd}_{0.4}\text{Sr}_{0.11}\text{CuO}_4$. Сплошные линии - результат численного моделирования линии в виде суммы двух вкладов с различными частотами (пунктирные линии).

соединении страйп-структуру, компонента, соответствующая более высокой частоте, может быть отнесена к ядрам лантана, соседствующим с областями плоскости CuO_2 , обедненными носителями заряда

(с развитыми АФ корреляциями). Низкочастотная же компонента – к ядрам лантана вблизи областей с повышенной концентрацией носителей (заряженным доменным границам). Были определены величины квадрупольного расщепления и параметры асимметрии η градиента электрического поля.

Были проведены также исследования образцов $\text{La}_{1-83-x}\text{Eu}_{0.17}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ с различным содержанием стронция. НТТ фаза приводит к подавлению сверхпроводимости [6] и для концентрации $\text{Eu } y=0.17$ граница перехода в сверхпроводящее состояние сдвигается в область $x=0.16$. Начиная с концентрации стронция $x=0.07$, линии, соответствующие

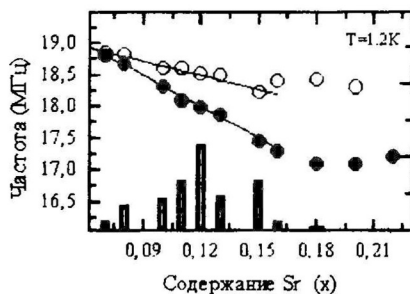


Рис.4. Зависимость частот ЯКР ^{139}La перехода ($\pm 5/2 - \pm 7/2$) от содержания $\text{Sr } (x)$ для двух составляющих спектра $\text{La}_{1-83-x}\text{Eu}_{0.17}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ при температуре 1.2K. Высота столбиков – отношение интенсивностей высокочастотной и низкочастотной составляющих.

высокочастотным переходам, так же как и в случае La-Nd соединения, имеют асимметричную форму и могут быть представлены в виде суперпозиции двух линий: более широкой – низкочастотной и узкой – высокочастотной. Можно считать, что, как и для La-Nd соединения, соответствующая разность градиентов электрического поля обусловлена неоднородностями (модуляцией) распределения электронной плотности в системе. Эволюцию последнего с ростом допирования отражает как увеличение расщепления компонент спектра с ростом числа дырок в системе (рис.4), так и изменение их относительной интенсивности. Тот факт, что распределение

электронной плотности в плоскостях CuO_2 проявляется в наблюдаемой линии ЯКР, позволяет считать, что оно носит стационарный характер на масштабе времени порядка обратной разности частот двух компонент спектра ЯКР. Пиннинг страйп-структуры в НТТ фазе $\text{La}_{1.83-x}\text{Eu}_{0.17}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ при $x \approx 1/8$ подтверждается как ростом вклада высокочастотной компоненты спектра, так и появлением дополнительного канала поперечной релаксации, который и доминирует при низких температурах в окрестности $x=1/8$. Этот критический вклад в релаксацию обусловлен ростом антиферромагнитной скоррелированности магнитных моментов меди. То, что критические АФ флуктуации проявляются лишь в поперечной релаксации, позволяет предположить, что они связаны только с продольным относительно оси квантования полем.

§2. Второй параграф пятой главы посвящен исследованию соединения $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$, переходящего в НТТ фазу вблизи $x=1/8$. Методом ЯКР ^{139}La было установлено, что линия, соответствующая переходу $\langle 7/2 \rangle \leftrightarrow \langle 5/2 \rangle$, для образца с концентрацией 0.125 также может быть разложена на две составляющих. Исследование перехода $\langle 3/2 \rangle \leftrightarrow \langle 1/2 \rangle$ показало наличие на позиции лантана магнитного поля величиной 450 Э. Наиболее интересный из полученных нами спектров ЯКР ядер меди наблюдался при 1.3К на образце с содержанием бария $x=0.125$. Он представлял собой широкую линию в диапазоне 20-80 МГц с неразрешенными пиками между 30 и 40 МГц, которая является комбинацией нескольких различных сигналов. Такая форма спектра и его параметры являются весьма необычными, по сравнению с линией, наблюдающейся обычно в купратах лантана, находящейся в диапазоне 32-40 МГц.

Частота ЯКР меди, при допировании может изменяться по двум причинам: 1) Изменение длины связи Cu-O, происходящее из-за замещения лантана барием, сдвигает частоту резонанса в сторону более низких значений: $\Delta\nu_Q = -aх$. 2) Увеличение эффективного заряда на меди приводит к

положительному сдвигу частоты $\Delta\nu_Q = bх$. Линия с частотой более 40 МГц, по-видимому, связана с переходом $(-1/2) \rightarrow (+1/2)$ ядер во внутреннем магнитном поле. Учитывая это, три компоненты спектра были объяснены нами наличием различных позиций меди. Позиция А, эффективный заряд на которой близок к нулю расположена в свободных от дырок областях медь-кислородной плоскости. Позиция В имеет избыточную концентрацию дырок (~ 0.18) и находится в заряженной доменной границе. Позиция С располагается в магнитоупорядоченном домене. Эффективный момент меди в таком случае равен $0.29\mu_B$, что согласуется с данными мюонных экспериментов [7].

Характер спектров, отражающих наличие трех позиций меди, показывает, что в данном случае мы имеем дело с запиннигованной (на масштабах времени более 10^{-7} сек) страйп фазой в Cu-O плоскости. Пиннингу, очевидно, способствуют переход в НТТ фазу и эффекты несоразмерности при уровне допирования, близком к 1/8. По мере увеличения допирования происходит депиннинг, и при $x \geq 0.15$ широкий сигнал, характерный для запиннигованной страйп-фазы, исчезает.

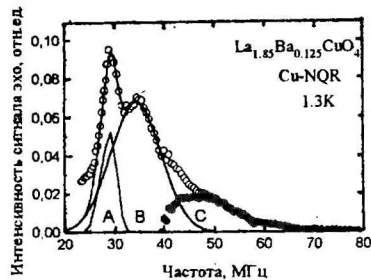


Рис.8. Спектр $^{63,65}\text{Cu}$ ЯКР $\text{La}_{1.875}\text{Ba}_{0.125}\text{CuO}_4$ при 1.3K. Сплошными линиями показан результат фитинга низкочастотной части спектра.

ет, так как внутреннее магнитное поле нивелируется из-за быстрого движения страйпов. Спектр ЯКР при этом трансформируется в стандартный узкий ^{63}Cu -ЯКР сигнал. Очевидно, именно резким уменьшением подвижности носителей заряда в результате пиннинга страйп-структуры объясняется подавление сверхпроводимости при уровне допирования $1/8$.

Заключение содержит основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты работы:

Исследования, результаты которых изложены в диссертационной работе, показывают, что в зависимости от степени подвижности допирующего элемента в купратах лантана реализуются различные типы фазового расслоения. Результаты работы свидетельствуют, что электронное фазовое расслоение и структурные трансформации в лантановых купратах тесно взаимосвязаны и оказывают сильное влияние друг на друга.

I. В случае допирования кислородом, имеющим высокую подвижность при комнатных температурах, в образце при охлаждении происходит структурное фазовое расслоение, оказывающее существенное влияние на его свойства в сверхпроводящем и нормальном состоянии. Изучение этих трансформаций позволяет сделать следующие выводы:

1. Обогащенные избыточным кислородом области допированного кислородом купрата лантана подвержены расслоению на несколько сверхпроводящих фаз с различными T_c и термической устойчивостью. Трансформация $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ при уменьшении уровня допирования сопровождается перераспределением избыточного кислоро-

да. Характер трансформации наиболее стабильных фаз указывает на упорядоченное расположение избыточного кислорода

2. Особенности 14-градусной фазы с аномально низкой T_c при большом содержании избыточного кислорода, характеризующейся наличием значительного количества локализованных носителей заряда, свидетельствуют о возможном образовании в ней несоразмерных корреляций зарядов и спинов, вызывающих подавление сверхпроводимости.

3. Допирование La_2CuO_4 избыточным кислородом приводит к появлению ферромагнитно упорядоченных областей, вектор ферромагнитного упорядочения которого направлен перпендикулярно медь-кислородным плоскостям. Причиной ферромагнитного упорядочения могут служить структурные изменения, происходящие в La_2CuO_4 при внедрении избыточного кислорода, оказывающие влияние на изменение ориентации перпендикулярных медь-кислородной плоскости компонент магнитных моментов меди.

II. В рамках данной работы подтверждено предположение, что в купратах лантана, допированных барием, а также стронцием в сочетании с европием и неодимом, возникает динамическое разделение зарядов и спинов.

1. Существующее в НТТ фазе купратов лантана неоднородное распределение зарядовой плотности носит стационарный характер на масштабе времени порядка 10^{-6} сек. Трансформация спектра ЯКР ^{139}La позволяет проследить эволюцию картины электронного фазового расслоения при изменении уровня допирования.

2. Появление дополнительного канала поперечной релаксации в $\text{La}_{2-x-y}\text{Sr}_x\text{Eu}_y\text{CuO}_4$ при росте допирования и понижении температуры

указывает на увеличение антиферромагнитной скоррелированности магнитных моментов меди.

3. Обнаружены три неэквивалентных позиции меди, характеризующиеся различной локальной концентрацией дырок и величиной внутреннего магнитного поля. Определена амплитуда изменения локальной плотности заряда в страйп-структуре плоскости CuO_2 и величина эффективного момента меди в магнитоупорядоченных полосовых доменах. Показано, что при x , близких к $1/8$, при низких температурах в НТТ фазе происходит пиннинг страйп-структуры.

Основные результаты диссертации изложены в следующих статьях:

[A1] E.L.Vavilova, N.N.Garif'yanov, E.F.Kukovitsky, G.B.Teitelbaum. *Investigation of the phase separation in superconducting regions of $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$* // Physica C v.264 (1996) p.74.

[A2] E.L.Vavilova, N.N.Garif'yanov, G.B.Teitel'baum. *The phase separation in superconducting regions of $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$* // Cz.J.Phys. v.46 (1996) p.1407.

[A3] Е.Л.Вавилова, Н.Н.Гарифьянов. *Прямое обнаружение ферромагнитного порядка в электрохимически нахлороженном $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$* . // Письма в ЖЭТФ т.66 (1997) с.470.

[A4] N.N.Garif'yanov, E.L.Vavilova. *Observation of Ferromagnetic Order in Electrochemically Oxidated $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$* // Physica C, v.282-287 (1997) p.1321.

[A5] Г.Б.Тейтельбаум, Е.Л.Вавилова, Б.Бюшнер, Х.Лютгемейер. *Электронное фазовое расслоение в низкотемпературной*

тетрагональной фазе лантан-стронциевых купратов по данным якр
¹³⁹La. // Письма в ЖЭТФ т.67 (1998) с.344.

[A6] G.Teitel'baum, B.Buchner, H.Lutgemeier, E.Vavilova. *The localized holes properties in LTO and LTT Phases of lanthanum-stronthium cuprates.* // J.Low Temp.Phys. v.105 (1996) p.407.

[A7] E.Vavilova, E.Kukovitskij, G.Teitel'baum. *The NQR picture of electronic phase separation in the lanthanum-barium cuprates.* // Physica B v.280 (2000) p.205

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. V.J.Emery, S.A.Kivelson and H-Q.Lin. *Phase separation in the t-J model.* // Phys.Rev.Lett. v.64 (1990) p.475.

2. D.Poilblanc and T.M.Rice. *Charged solitons in the Hartree-Fock approximation to the large-U Hubbard model* // Phys.Rev.B v.39 (1989) p.9749; J.Zaanen and O.Gunnarson. *Charged magnetic domain lines and the magnetism of high-Tc oxides* // Phys.Rev.B v.40 (1989) p.7391.

3. R.K.Kremer, V.Hizhnyakov, E.Sigmund, A.Simon, K.A.Muller. *Electronic phase separation in La-Cuprates. On the role of hole and oxygen diffusion.* // Z.Phys.B v.91 (1993) pp.169.

4 J.D.Jorgensen, B.Dabrowski, Shigou Pei, D.G.Hinks, L.Soderholm, B.Morosin, J.E.Schirber, E.L.Venturini, D.S.Ginley. *Superconducting phase of La₂CuO_{4-δ}: A superconducting composition resulting from phase separation.* // Phys.Rev.B v.38 (1988) p.11337.

5 J.M.Tranquada, J.D.Axe, N.Ichikawa, A.R.Moodenbaugh, Y.Nakamura, S.Uchida. *Evidence for stripe correlations of spins and holes in copper oxide superconductors* // Nature v.375 (1995) p.561.

6 . B.Buchner, M.Breuer, A.Freimuth, A.P.Kampf. *Critical buckling for the disappearance of superconductivity in rare-earth-doped $La_{2-x}Sr_xCuO_4$* . // Phys.Rev.Lett. v.73 (1994) p.1841.

7 K.Kawano, K.Kumagai. *Positive muon spin rotation study on magnetic order in $La_{2-x}M_xCuO_4$ ($M=Ba, Sr$) around $x=0.12$* . // Physica B v.194-196 (1994) p.351.



2-60